

PREDAVANJE BR. 5-1. POBOLJŠANJE TLA

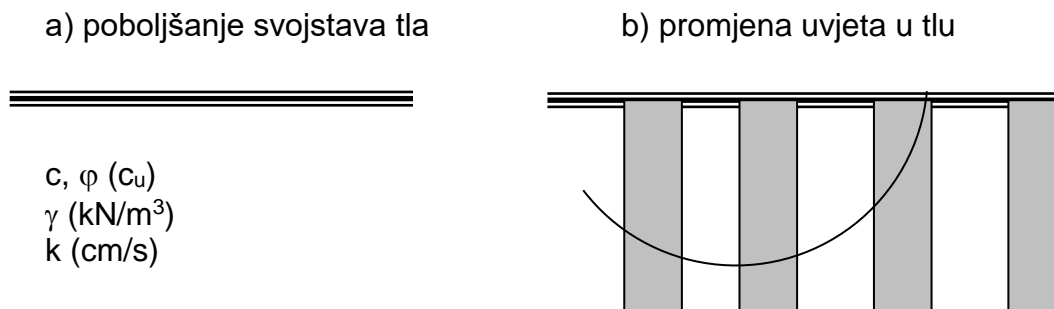
Poboljšanje tla provodi se uvijek zbog prevelikih slijeganja, ili opasnosti od nedovoljne nosivosti temeljnog tla ispod nasipa.

Sve mjere poboljšanja mogu se svesti na sljedeće principe:

- mjere kojima se poboljšavaju svojstva tla
- mjere kojima se poboljšavaju uvjeti u tlu

Uvjeti u tlu i/ili svojstva tla mogu biti nedovoljno dobri za planirani zahvat: nosivost ispod temelja, osiguranje malih deformacija, brzinu konsolidacije, zaštitu od procjeđivanja, stabilnost pri iskopu i sl. U tom slučaju moguće je planirati poboljšanje svojstava tla (kada mijenjamo njegova svojstva) ili poboljšavati uvjete u tlu (kada se izvedbom dodatnih zahvata u tlu mijenjaju uvjeti). Time se racionalnije, brže i jednostavnije mogu ostvariti pretpostavke za sigurnu provedbu zahvata.

Spektar postupaka poboljšanja tla je vrlo velik. Općenito se radi o postupcima kojima se poboljšava tlo kao materijal (povećanje gustoće tla zbijanjem, promjena svojstava tla dodavanjem raznih dodataka) ili kojima se u tlu izvode dodatni elementi koji se tretiraju ili kao prosječno poboljšanje tla ili kao poboljšanje određene zone tla (razne vrste pilota, umetanje geosintetika, postupci ubrzavanja konsolidacije i sl.).



slika 1. Poboljšati se može tlo (povećanjem gustoće, povećanjem čvrstoće, smanjenjem propusnosti) - slika a), ili uvjeti u tlu - kada se poboljšavaju prosječna svojstva tla dodatkom nekog drugog materijala (npr. niz pilota o d šljunka) - slika b)

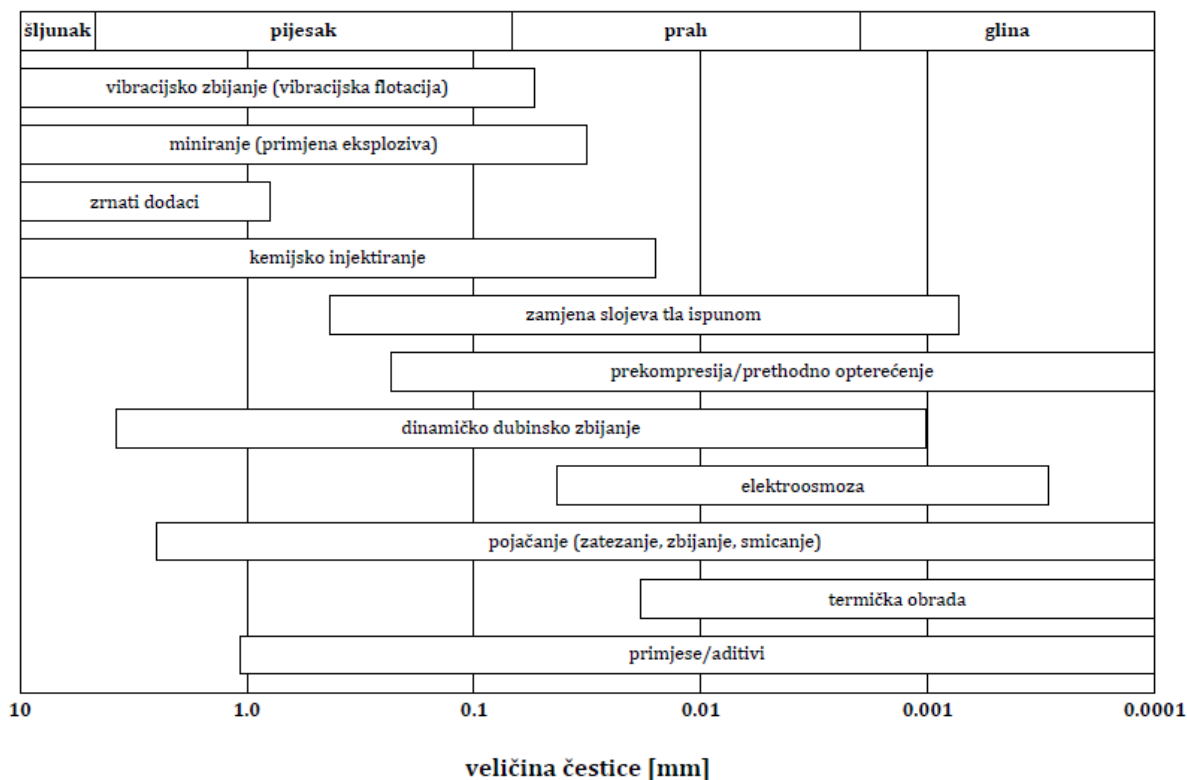
Tablica 1. Opis mjera poboljšanja tla

MJERA	PRINCIP POBOLJŠANJA	METODA	KOMENTAR METODE
svojstva tla	zbijanje tla	površinsko - valjanje	valjanje površine dinamičkim valjcima
		dinamičko – padajući teret	velika masa padajućeg tereta, uzastopne točke
		dubinsko zbijanje	vibroflotacija, eksplozije, piloti za zbijanje
	kemijski dodaci tlu	površinski – vapno, cement, vapno+cement, kemijski dodaci	dodavanje aditiva – cement, vapno, cem+vapno, kemikalije – pa onda valjanje takvog tla sa dodacima
		injektiranje	specijalno utiskivanje veziva u tlo po dubini pod visokim tlakom – mlazno injektiranje
		dubinsko miješanje	dodavanje aditiva po dubini uz miješanje tla
predopterećenje	izvedba nasipa, vakuum	eliminacija slijeganja predopterećenjem	
uvjeti u tlu	zamjena tla		meko tlo zamijeniti boljim i zbiti
	vertikalni drenovi		ubrzavanje konsolidacije
	armiranje tla		ojačanje temeljnog tla i nasipa – pokosi
	miješana metoda		više kombiniranih metoda

TABLICA METODA SA OPISOM SVAKE METODE - UKRATKO + JURAN (2000)
 Tablica 1: Podjela/klasifikacija tehnologija poboljšanja tla (Terashi i Miki, 1999)

Vrsta	Tehnologija	Glavni učinak poboljšanja	Adekvatna vrsta tla
Poboljšanje površine tla se često koristi u kombinaciji s dubokim „in situ“ poboljšanjem tla			
Površinska poboljšanja	Drenažne jame i kanali	Osigurava protočnost drenažom	glina, organska tla
	Postavljanje pješčanog tepiha	Osigurava protočnost drenažom, Funkcionira kao horizontalna površinska odvodnja	
	Geosintetičko pojačanje	Osigurana stabilnost pješčanim tepihom	
	Stabilizacija plitko postavljenom primjesom	Osigurava čvrstoću i protočnost	bilo koje tlo
Dubinska „in situ“ poboljšanja tla			
Zamjena	Iskop i zamjena	Povećava posmičnu silu i osigurava stabilnost, Smanjuje slijeganje	glina, organska tla
	Eksplziv ili zamjena premještanjem		
Ubrzanje konsolidacije prethodnim opterećenjem sa i bez umjetne odvodnje (drenaže)	Prethodno opterećenje preopterećenjem (dodatnim teretom)	Povećava posmičnu silu i osigurava stabilnost, Smanjuje rezidualno slijeganje	stišljiva tla s niskom propusnosti izložena velikoj primarnoj konsolidaciji; glina, organska tla
	Prethodno opterećenje snižavanjem razine podzemne vode		
	Prethodno opterećenje vakuumom		
Drenaža	Šljunčani dren	Povećava otpornost ukapljivanja smanjenjem tlaka vode u porama (pornog tlaka)	rastresit ukapljiv pijesak
Zgušnjavanje	Zabijeni piloti	Povećava ujednačenost tla radi smanjenja neujednačenog slijeganja, Povećava posmičnu silu, Povećava otpornost ukapljivanja	različito granulirana tla, komunalni otpadni materijali, s relativno visokom propusnosti
	Metoda sabijanja pijeska		
	Zabijanje vibrirajuće šipke		
	Vibroflotacija		
	Nabijanje teškim teretom (dinamička konsolidacija)		
Ispunjavanje	Prodirujuće ispunjavanje	Zaustavlja ili smanjuje prodor vode, Povećava posmičnu silu tla, Ublažava deformacije strukture	homogena propusna tla
	Konsolidacijsko ispunjavanje		rastresit pijesak
	Injektiranje pojedinih dijelova		od praškastog do glinovitog tla
	Mlazno injektiranje		bilo koje tlo
Stabilizacija primjesom	Metoda dubinskog miješanja sa švedskim vapnenim stupovima	Povećava posmičnu silu, Smanjuje slijeganje, Povećava otpornost ukapljivanja povećanjem kohezije ili ograničavanjem rastresitosti zemljane	bilo koje tlo, najviše za glinu i organska tla, primjenjiv i za rastresit pijesak

		mase	
	Prethodno miješanje	Povećava koheziju radi veće otpornosti na ukapljivanje prije sušenja	rastresita ukapljiva tla
	Lagani geo-materijali	Regulira jediničnu težinu tla, povećava posmičnu silu i smanjuje slijeganje	bilo koje tlo
Toplinska stabilizacija	Grijanje izgaranjem	Poboljšava čvrstoću i deformacijske karakteristike	les
	Smrzavanje tla	Privremene svrhe/ Povećava posmičnu silu, Suzbija deformacije i smanjuje prodor vode	bilo koje vlažno tlo
	Vitrifikacija/ubrizgavanje zagrijanog zraka ili vode u tlo	Sanacija zagađenih tla	zagađena tla
Pojačanje tla	Geosintetici, piloti od korijenja biljaka, čavlane tlo, sidra, itd.	Povećava čvrstoću i deformacijske karakteristike poboljšanog sustava tla	
Razni postupci	Korištenje kombinirane metode	Savladava niz problema koji su povezani s teškim uvjetima tla	
	Korištenje laganih materijala kao što su EPS blokovi	Radi smanjenja aktivne sile smanjuje težinu zemljane mase	
	Korištenje teških materijala	Povećava težinu tla radi uravnoteženja djelovanja tlaka na podsloj tla	



slika 2. Područja primjene pojedine metode poboljšanja, ovisno o krupnoći zrna tla

Analiza mogućih varijanti poboljšanja tla podrazumijeva ne samo vrednovanje i analizu troškova primjene metode, nego ukupan efekt poboljšanja, koji se reflektira na objekt, njegovu izgradnju, održavanje, dakle na sve efekte vezane uz poboljšanje i objekt.

1. POBOLJŠANJE TLA KAO MATERIJALA

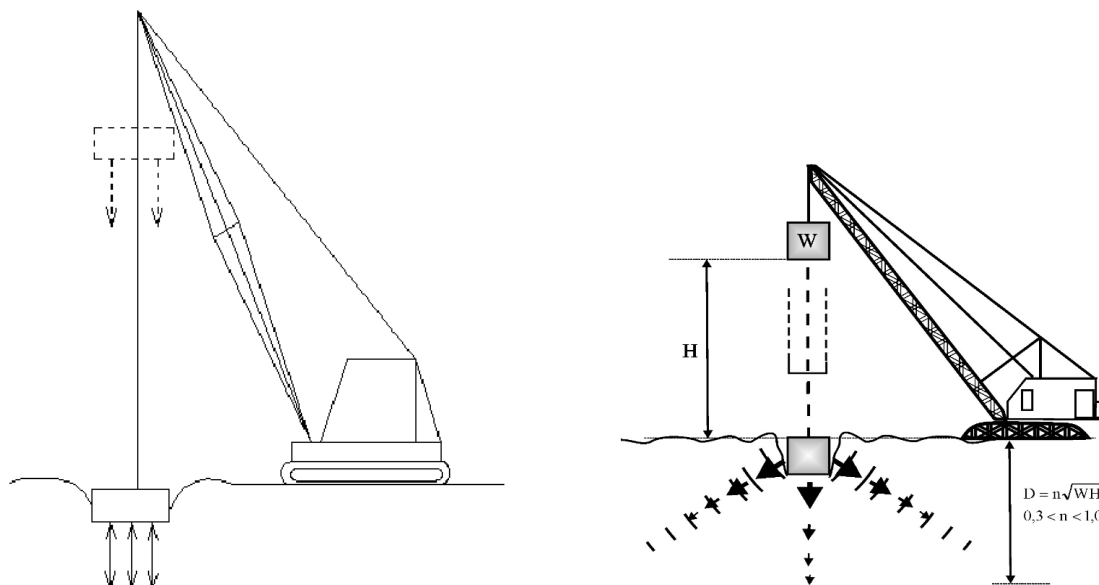
Tlo može imati nedovoljnu čvrstoću, krutost (otpor deformabilnosti) ili nepropusnost, a ta se svojstva mogu unaprijediti. Unapređenje tih svojstava moguće je mehaničkim ili kemijskim postupkom.

MEHANIČKI POSTUPCI

- povećanje gustoće
- zbijanje vibro-valjcima ;

1.1. dinamičko zbijanje padajućim teretom

1.1.1. Tehnike dubinskog zbijanja



Slika 3. Shematski prikaz dubokog zbijanja – padajući teret

Dubinsko zbijanje se primjenjuje pri dinamičkoj konsolidaciji većih i dubljih prostora koherentnog ili nekoherentnog osobito aluvijalnog tla gdje zadana dubina konsolidacije prelazi tehničke mogućnosti uobičajenog površinskog zbijanja valjcima.



Slika 4. Prikaz dubinskog zbijanja

Dubina do koje se ostvaruju efekti zbijanja procjenjuje se prema izrazu:

$$D_{\max} = n (W \cdot H)^{1/2}, \text{ pri čemu je:}$$

- W - težina utega (t)
- H - visina padanja (m)
- n - iskustveno 0,5

Na učinak dubinskog zbijanja udarom osobito utječe:

- vrsta tla (granulometrijski sastav, postotak sitnih čestica),

- stupanj zasićenosti i nivo podzemne vode,
- početna gustoća tla,
- visina pada mase i površina udara mase
- raspored mjesta udara po predviđenom području sabijanja tla udarom,

- zbijanje eksplozijama (npr. morski mekani sedimenti)

- za dobro propusne materijale
- poseban plan zbijanja za dinamičko zbijanje
- potrebno veliko iskustvo
- veliki trošak priperme, za velike poslove isplativo

1.2. KEMIJSKI POSTUPCI

Postoje kemijski postupci poboljšanja svojstava tla kojima se volumen tla obogaćuje nekim kemijskim spojem čiji je zadatak da unaprijedi neka svojstva, npr. čvrstoću. Pokušalo se na razne načine postići dobre rezultate, no općenito stručnjaci smatraju da su ti postupci ograničeni na specifične uvjete u tlu i/ili na materijale koji se tlu dodaju.

U Hrvatskoj su isprobani neki takvi kemijski dodaci: dodatak za materijale u cestogradnji, kojim se trebalo smanjiti osjetljivost tla na vodu (smrzavica, manja nosivost), ili povećati čvrstoća materijala na kosinama opterećenim klizanjem.

Općeniti problem ovih postupaka svodi se na slijedeće :

- dodaci se doziraju u malim količinama i njihova jednolična raspodjeljenost po volumenu tla je tehnički teško izvediva, a time i skupa
- dodaci različito reagiraju na mineraloški sastav pojedinog tla, pa je direktan prenos iskustava nedopustiv
- prije odobrenja uporabe nekog takvog postupka potrebno je detaljnim programom ispitivanja relevantnih parametara i uvjeta izvedbe u laboratoriju i na terenu dokazati efekte na tlo
- poboljšanje obično podrazumijeva i vremenski efekt - povećanje efekta s vremenom, što mora biti obuhvaćeno ispitivanjem i kontrolom

Najpoznatiji slučaj takvog poboljšanja je **dodavanje vapna koherentnom tlu**. Ovo se najčešće izvodi u cestogradnji, pri pripremi podloge ili nasipa, kada se radi o slojevima tla. Usitnjenom tlu se dodaje vapno radi smanjenja vlažnosti i povećanja čvrstoće. Otprilike se za svakih 1% dodatka vapna smanjuje vlažnost za 1%. To može biti skup postupak, a postoji opasnost da se promjenom kemizma vode koja teče kroz takvo tlo izgubi postignuti efekt cementacije.

Stabilizacija vapnom koristi se kod fino granuliranog tla obično u količini od 5-10%. Kada se dodaje glinenom tlu, odvija se nekoliko kemiskih reakcija, uključujući i zamjene kationa u ione kalcija, koje utječu na:

- smanjenje granice tečenja,
- povećanje granice plastičnosti,
- smanjenje indeksa plastičnosti

- povećanje granice skupljanja,
- povećanje obradivosti i
- poboljšanje čvrstoće i deformacijskih osobina tla.

Ova stabilizacija se najčešće izvodi u cestogradnji, pri pripremi podloge ili nasipa, kada se radi o slojevima tla. Usitnjenom tlu se dodaje vapno radi smanjenja vlažnosti i povećanja čvrstoće. Otprilike se za svakih 1% dodatka vapna smanjuje vlažnost za 1%. To može biti skup postupak, a postoji opasnost da se promjenom kemizma vode koja teče kroz takvo tlo izgubi postignuti efekt cementacije.



Slika 5. Primjer dodavanja vapna (ili cementa) slojevima tla prije zbijanja

Takvo tlo je kruće ali i sklonije pukotinama (opada plastičnost osnovnog materijala). Na primjer eksploatacijska naftna polja Žutica u Ivanić Gradu sanirana su uporabom vapna i cementa, u dijelu u kojem se zagađeno tlo trebalo neutralizirati i eventualno koristiti za podloge sekundarnih prometnica u nalazištu.



Slika 6. Postupak stabilizacije tla vapnom

Stabilizacija vapnom na terenu može se izvesti na više načina:

- Materijal "in situ" i/ili materijal iz pozajmišta miješa se sa određenom količinom vapna na terenu i nabija poslije dodavanja vode.
- Materijal sa vapnom uz dodatak vode miješa se u postrojenju, razastire u slojevima i valja valjcima
- Vapnena tekuća smjesa injektira se u tlo na dubinu 4,0-5,0 m. Injektirana smjesa od vapna priprema se u posebnim mješačima i pomoću pumpi injektira pod velikim pritiskom u trup puta, odnosno objekat.

Cement se koristi kao stabilizacijski materijal za tlo posebno kod izvođenja autocesta i zemljanih brana. Količina cementa za stabilizaciju ovisi o vrsti tla, a kreće se od 6-

14% volumena. Nevezano tlo i glinovito tlo niske plastičnosti pogodno je za cementnu stabilizaciju. Slično vapnu, cement povećava čvrstoću tla, koja se vremenom povećava. Priprema i ugradnja cementa sa tlom slična je izvođenju stabilizacije vapnom.

Elektrofilterski pepeli predstavljaju ostatke sagorijevanja samljevenog ugljena u ložištima termoelektrana i sličnim postrojenjima. To su fini prašinski materijali loptastog oblika, koji se primamo sastoje od oksida silicija, aluminijskog, magnezija, željeza, kalcija i drugih primjesa. Pucolanski pepeli sa kalcijevim hidroksidom izazivaju reakciju iz koje proizlaze cementni produkti. Učinkovita smjesa može se pripremiti sa 10-35% lebdećeg pepela i 2-10% vapna. Do danas su se ovi pepeli, sa većom ili manjom pucolanskom aktivnošću, koristili za stabilizaciju podloga za putove. Tlo sa vapnom i pepelom je ugrađivano i sabijano u slojevima sa optimalnom sadržajem vlage.



Slika 7. Utovar elektrofilterskog pepela za poboljšanje tla

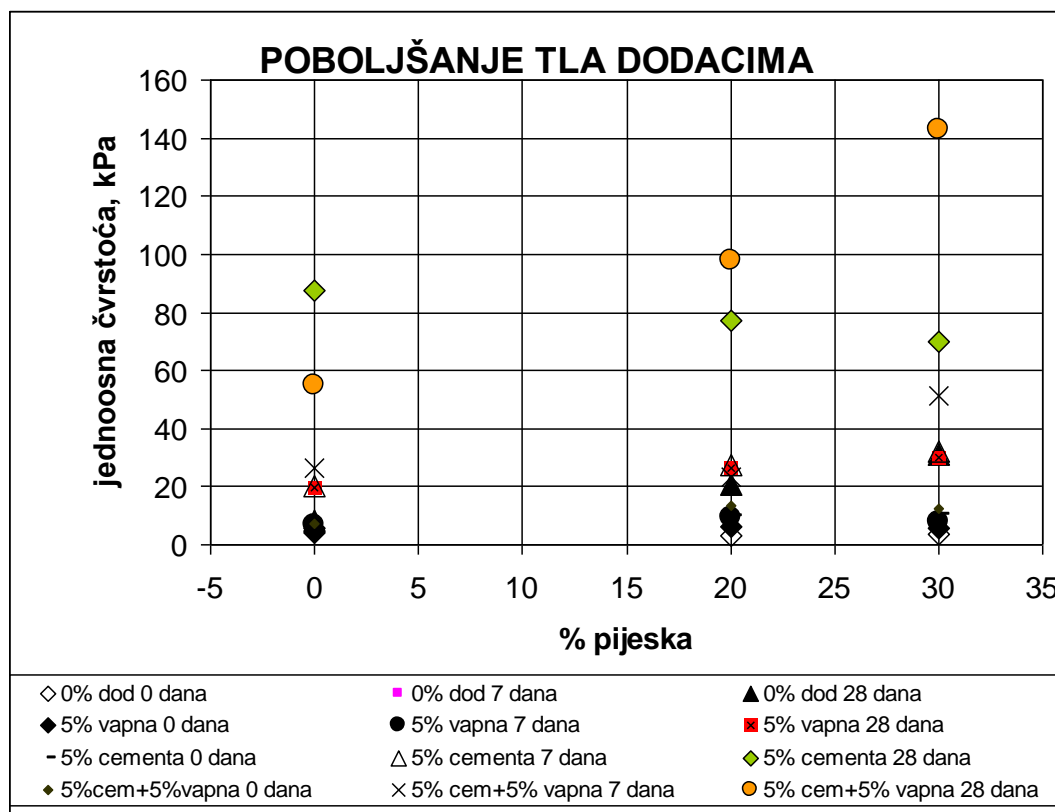
Elektrofilterski pepeo iz TE Gacko je vrlo specifičan po svome mineraloškom sastavu, jer sadrži do 55% slobodnog živog vapna i anhidrita, te nema pucolanska svojstva (Rogić, Selimovic, Dasović, 1986). Dodavanjem veoma aktivne pucolanske silikatne prašine (Silica fume) dobivene pri proizvodnji metalnog silicija i ferosilicija, sa elektrofilterskim pepelom iz ove termoelektrane dobiva se vezivo, koje sa vodom izaziva brzu reakciju. Ovo vezivo primjenljivo je također za poboljšanje osobina tla miješanjem "in situ" sa tlom uz potreban dodatak vode ili injektiranjem

Takvo tlo je kruće ali i sklonije pukotinama (opada plastičnost osnovnog materijala). Na primjer eksploatacijska naftna polja Žutica u Ivanić Gradu sanirana su uporabom vapna i cementa, u dijelu u kojem se zagađeno tlo trebalo neutralizirati i eventualno koristiti za podloge sekundarnih prometnica u nalazištu.

Rezultati dijela ispitivanja prikazani su na slici 8. Osnovni materijal (visokoplastična organska glina s prahom) miješan je s vapnom i cementom, a dodavan je i pijesak. Provjeravana je nedrenirana čvrstoća pri starosti uzoraka 0 dana (odmah nakon miješanja prirodnog tla i dodataka) i nakon 7 i 28 dana od pripravljanja uzoraka. Uzorci su zbijani u cilindru.

Vidljivo je da i vrijeme i doaci utječu na porast čvrstoće tla. Dodatak pijeska omogućava povećanje čvrstoće u većoj starosti uzorka i kod dodatka cementa. Neupotrebljiv

materijal od iskopa može se tako pripremiti za podlogu sporednim prometnicama u naftnom polju.



slika 8. Prikaz ispitivanja povećanja čvrstoće gline uz dodatak vapna, cementa i pijeska (naftno polje Žutica, Hrvatska - Mulabdić 1997, osnovni materijal je visokoplastična i organska prašinstava glina, s granicom tečenja iznad 100%)

Posebnu pažnju trebalo bi u eventualnoj realizaciji ovakvog postupka obratiti na pripremu tla i kontrolu njegovih svojstava.

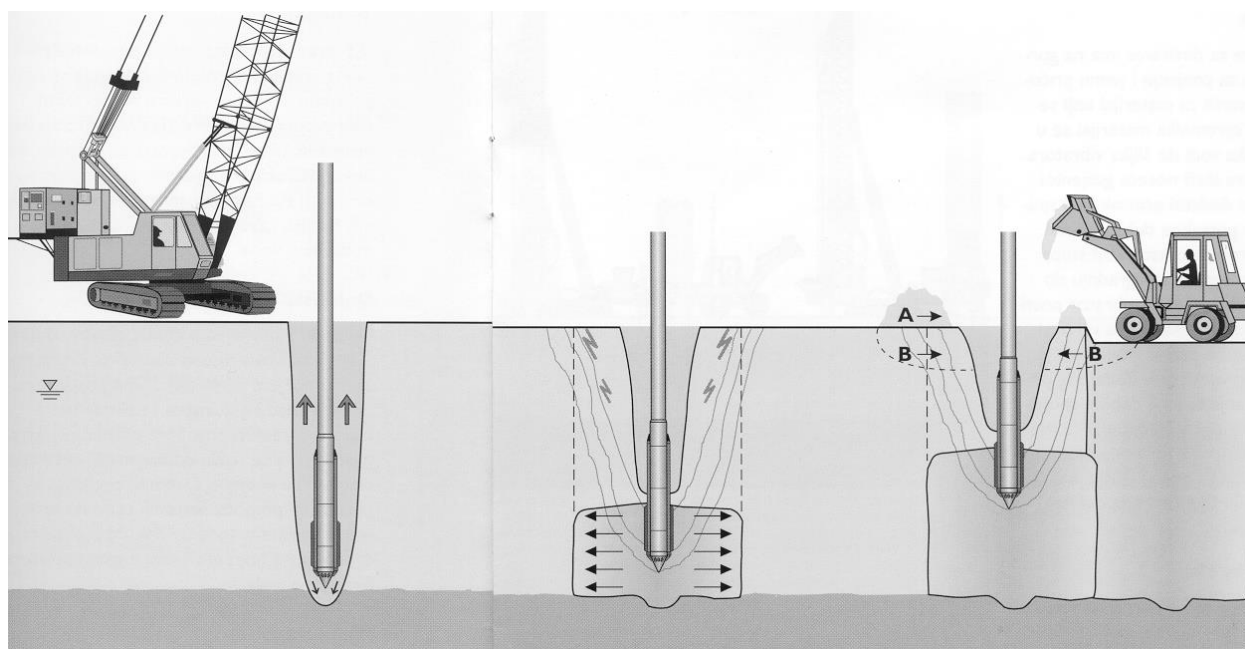
Neki dodaci koji su planirani za primjenu u Hrvatskoj za cestogradnju i povećanje čvrstoće prašinstavih i glinovitih materijala nisu dali dobre rezultate.

Veoma često je tlo rahlo, tj. nedovoljno zbijeno, što izaziva manju čvrstoću i veću deformabilnost. Ukoliko se ne radi o debelim naslagama tla (do 2-3 m) moguće je teškim valjcima dodatno zbiti tlo. Za veće debljine potrebno je dubinsko zbijanje, što se može postići raznim tehnikama. Jedna od njih je da se teški teret baca s velike visine pomoću dizalice (npr. blok betona) i time u pojedinim točkama unosi dodatnu energiju zbijanja. Progušćenjem točaka može se postići dobar efekt. Ovaj postupak ograničen je na vrlo propusne materijale i nizak nivo podzemne vode.

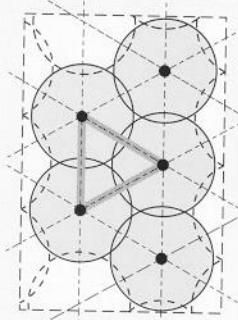
Puno je efikasniji postupak **DUBINSKO ZBIJANJE VIBRIRANJEM**. Danas se tlo može dubinski zbijati, pomoću uređaja koji se utiskuju u tlo i vibriranjem utječu na premještanje čestica i povećanje gustoće tla.

Na slici 9. prikazan je takav postupak. Utiskivanjem određenog uređaja u tlo (vibroglave ili vibrokriila) može se njegovom trešnjom i poluzakretanjem u tlu (uz određeni režim i tehnologiju rada) izazvati pomjeranje čestica prema gušćem poretku, što izaziva

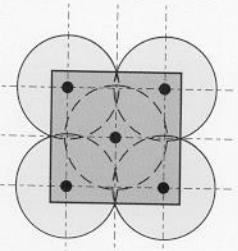
povećanje gustoće u tlu, a i sniženje površine terena. Raspored bušotina i izbor pribora temelji se na tipu tla i željenim efektima.



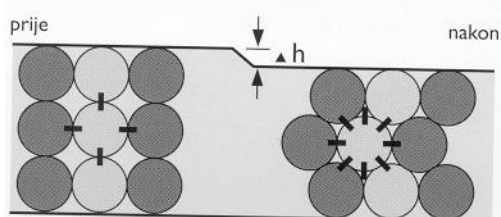
Zbijanje ispod površinskih opterećenja



Zbijanje ispod pojedinačnog temelja



Zbijenost tla prije i nakon PDVZ

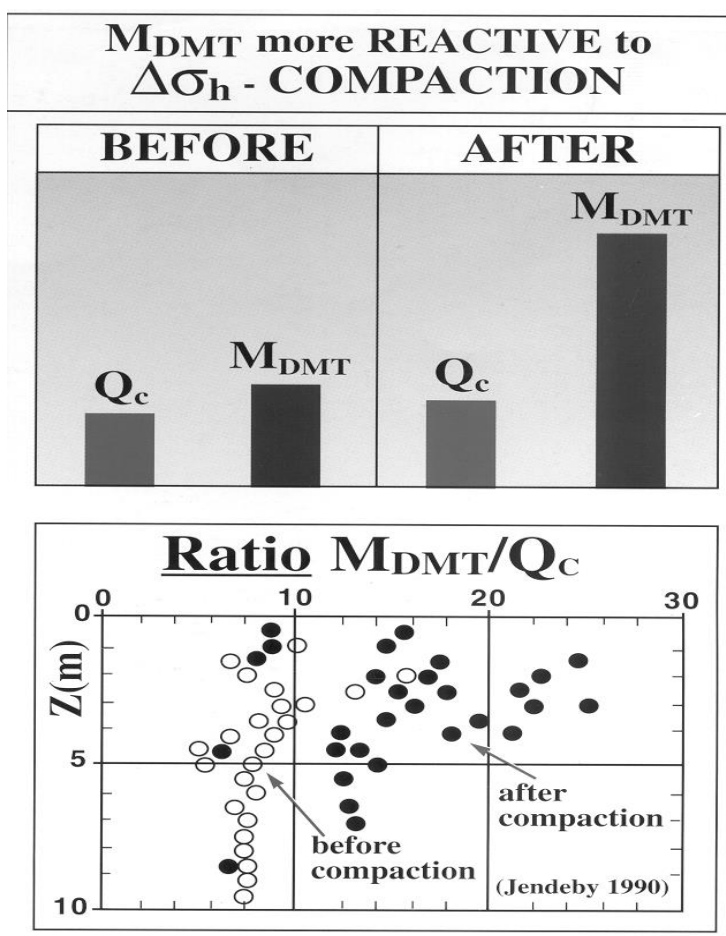


ibrator i formirani lijevak tla

sl. 9. Postupak dubinskog zbijanja vibriranjem Zbijanje se obavlja na račun premještanja čestica u gusći poredak, pod djelovanjem vibrirajućeg cilindra teškog oko 2 tone i duljine oko 2-3 m.

Kontrola postignutih efekata zbijanja obavlja se obično penetracijskim postupcima. Na slici 10. prikazana je kontrola svojstava tla postupkom CPT I DMT prije i poslije zbijanja.

Vidljivo je da se dilatometrom Marchetti (DMT) bolje uočava poboljšanje u tlu (mjereno modulom stižljivosti). Dakle, moguće je i izborom postupka ispitivanja utjecati na ocjenu postignutog poboljšanja tla, što je važno znati u postupku kontrole radi donošenja odluka o uspješnosti provedenog postupka.



slika 10. Efikasnost dilatometra Marchetti u odnosu na statičku penetraciju (CPT) u pogledu ispitivanja stupnja poboljšanja tla zbijanjem (prema Marchetti, 1997).

Na kraju treba naglasiti da se poboljšanje tla projektira kao i drugi geotehnički zahvati, a to znači da se utvrđuju svojstva relevantnih materijala na terenu i u laboratoriju kako bi se provjerile i odredile mjere i aktivnosti kojima se poboljšanje treba izvesti. Poseban dio projekta mora sadržavati i mjere kontrole i osiguranja kvalitete pripremnih i završnih radova, kojima će se objektivno ustanoviti stupanj poboljšanja svojstava tla. Pri tome je, kao što je pokazano, potrebno prepoznati pojedine postupke koji izraženije oslikavaju promijenjena svojstva (npr. kod zbijanja je važan bočni napon, koji bolje osjeti DMT od CPT pokusa).

PILOTI ZA POBOLJŠANJE TLA

Najveći broj poboljšanja tla svodi se na izvođenje mreže pilota, različitog promjera i razmaka, koji s osnovnim tlom tvore novo tlo prosječno boljih karakteristika.

Ti piloti mogu biti izvedeni kao mješavina osnovnog tla i vapna (ili vapna i cementa), od šljunka, ili kao specijalni piloti nastali cementiranjem osnovnog tla pod velikim tlakom (mlazno injektiranje).

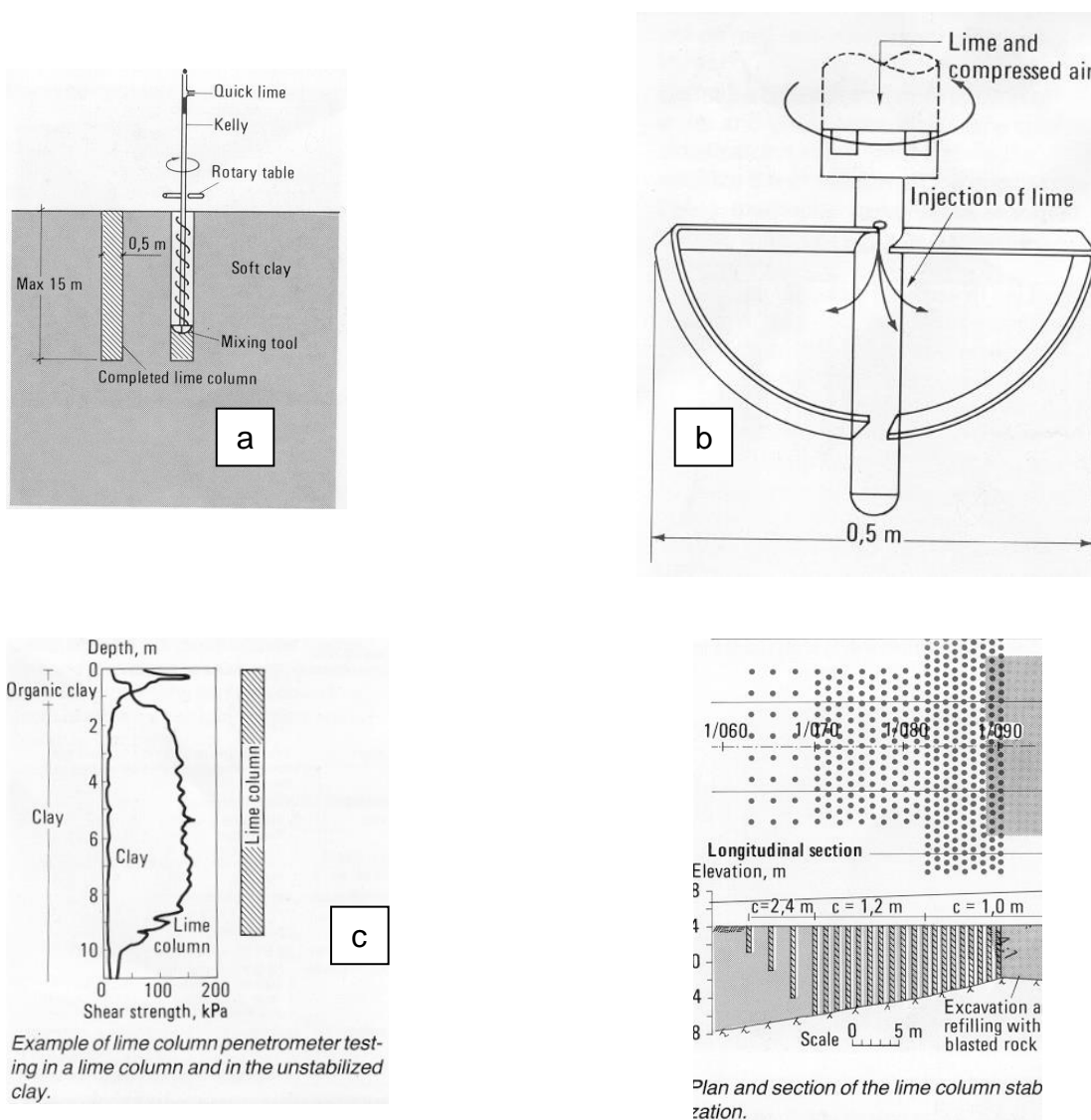
Ovim pilotima mogu se pojačati temeljna tla (povećanje nosivosti tla), poboljšati uvjeti stabilnosti kosine (prosječno veća čvrstoća na kliznoj plohi), smanjiti ukupna i

diferencijalna slijeganja te osigurati radijalno dreniranje. Mlazno injektiranje može pomoći kod zahvata raznog tipa, ali je ono skupo i traži vrloiskusne ekipe i posebne tehnike izvedbe .

a. VAPNENO-CEMENTNI PILOTI

Ovi piloti počeli su se raditi u Skandinaviji, gdje su temeljna tla često mekana i nedovoljne nosivosti. Princip rada objašnjen je na slici 10. Posebnim svrdlom razrahlju se tlo pri utiskivanju svrdla do planirane dubine, a pri njegovom izvlačenju cijev se rotira i ujedno upuhuje vapno (i cement) u tlo. Vapno se vremenom stvrdnjava pa povećanje čvrstoće raste u vremenu. Potrebni su mjeseci za znatan porast čvrstoće. Danas se vapno miješa s cementom (oko 40% cementa) pa je smjesa čvršća i brže se postiže konačna čvrstoća. Primjena ove tehnologije mora se ispitati u laboratoriju za svako tlo u kojem se namjerava izvesti ovakvo poboljšanje.

Razmak pilota je oko 1-3 m, a promjer pilota oko 0.5-0.7 m. U posljednje vrijeme metoda se koristi širom Europe. Maksimalne dubine do 15 m.



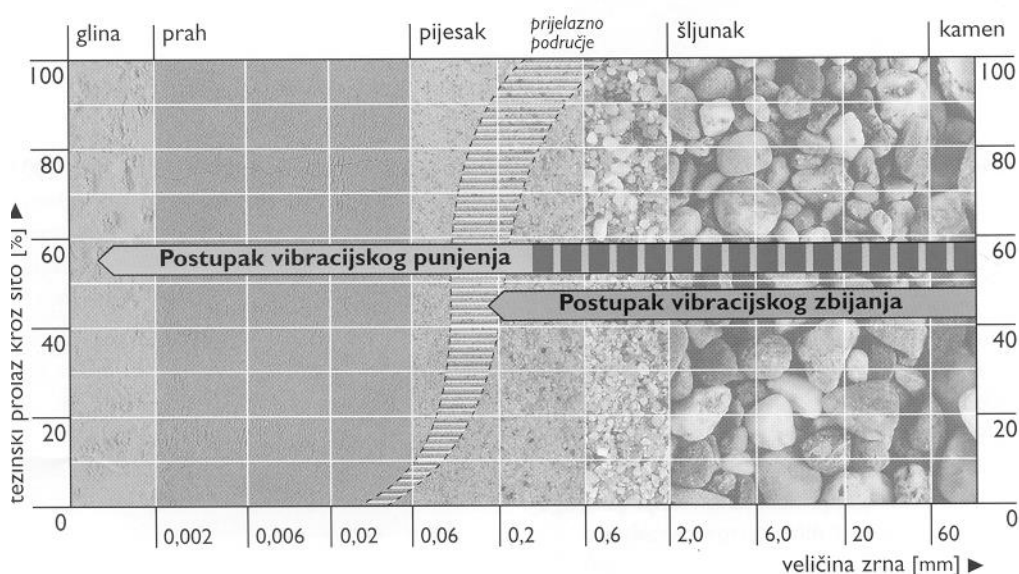
sl.10. Princip i primjer izvedbe vapnenih pilota: specijalna krila razrahljuju tlo (b) a pri izvlačenju upuhuje se vapno (a) ; poboljšanje čvrstoće je značajno i vremenski ovisno (c); primjer zvedenih pilota za temeljenje nasipa (d)

ŠLJUNČANI PILOTI U TLU

Izvede se slično dubinskom vibriranju, samo što se u tlo unosi šljunak. Cijev za vibriranje utiskuje se u tlo i od dna na gore u etažama ispušta šljunak koji zbija svojom težinom i vibracijom. Time se osnovno tlo zbija a šljunak postiže dobru gustoću i čvrstoću. U šljunak se može uvesti i cementno vezivo, tako da se dobiju vrlo nosivi piloti.

Na slici 11. vidi se da se postupak dubinskog vibriranja ograničava na nekoherentna tla, a postupak šljunčanih pilota se izvodi u svim tlima. Fluid koji pri spuštanju struji kroz vrh omogućava bolju prodornost u dubinu. Postoji tehnika sa zrakom i s vodom. Voda je efikasnija u zonama ispod nivoa podzemne vode.

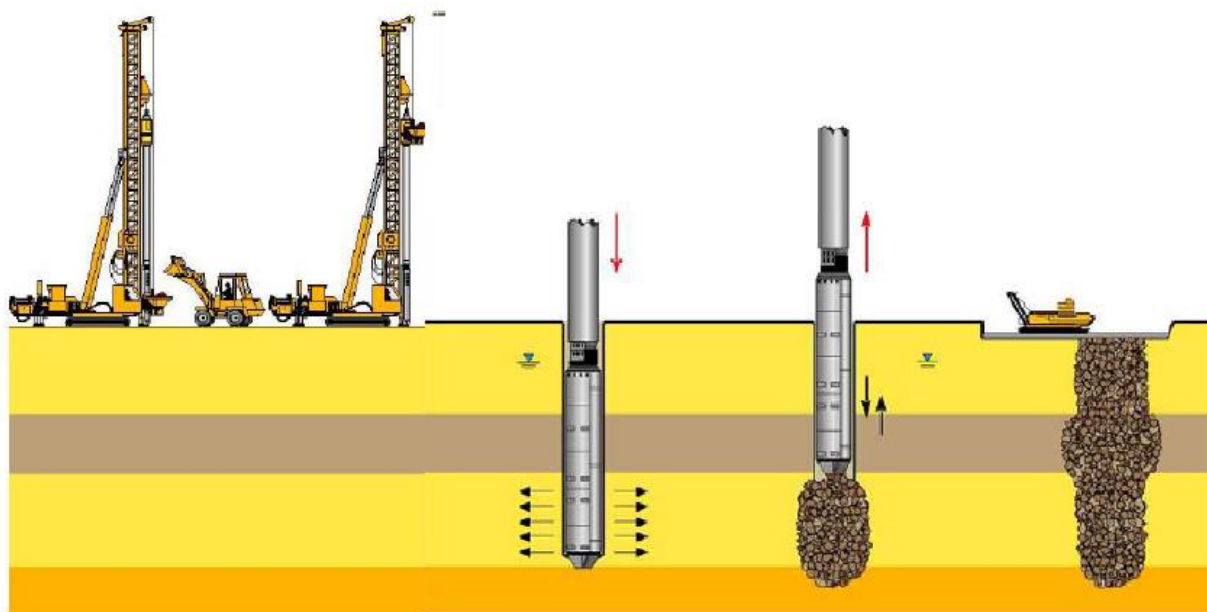
Granice primjene PDVZ



sl. 11. Utjecaj tipa tla i granulometrijskog sastava tla na uporabivost postupka

Postupak izvedbe šljunčanih pilota (slika 12) vrlo je efikasan i racionalan postupak, potvrđen u primjeni širom svijeta. U Hrvatskoj je tako izvedeno nekoliko objekata (Istra, tvornica za preradu vode SI.Brod, itd.).

Njime se povećava čvrstoća novog tla (miješanog tla), smanjuju slijeganja (ukupna i diferencijalna), pojednostavljuje temeljenje u teškim uvjetima i omogućava radijalno dreniranje, što drastično ubrzava slijeganje.



sl. 12. Izvedba šljunčanih pilota, utiskivanje, punjenje i zbijanje, zaravnanje platoa
 Promjer šljunčanih pilota je 60-80 cm, na razmaku 1,5 - 2,0 m, uz maksimalne dubine oko 20 m. Nosivost je oko 20-30 tona.

INJEKTIRANJE

Injektiranje je jedina metoda stabilizacije terena koja se sastoji u ubrizgavanju stabilizacijskih sredstava u tlo pod pritiskom, kroz bušotine, pomoću prikladnih strojeva, na području koje želimo konsolidirati.

Bez obzira na područje primjene metode injektiranja, sam postupak je u svojoj biti uvijek isti, a rezultati se razlikuju ovisno o tome da li se injektiranjem želi postići trajna ili privremena stabilizacija terena.

Injektiranjem se, prema definiciji, može postići:

- smanjenje vodopropusnosti
- povećanje čvrstoće i smanjenje deformabilnosti temeljnog tla
- pretvaranje diskontinuiranih građevina - izgrađenih od betonskih elemenata u masivne homogene građevine
- fiksiranje armatura i zatega za prednapinjanje
- ispunjavanje kontaktnih fuga između građevine i tla

Osnovni faktori koje moramo poznavati prije postavljanja zahtjeva za injekcijske zahvate i odluke o primjeni konkretne metoda injektiranja jesu:

1. Geološki faktori, pri čemu moramo poznavati vrstu stijena uslojenost te tektoniku užeg i šireg područja;
2. Petrografski faktori, pri čemu moramo poznavati sastav i strukturu stijene, kemijske osobine stijene te sistem lasova i mikropukotina;
3. Hidrogeološki faktori, pri čemu moramo poznavati karakter nadzemne i podzemne vode, njeno kretanje i kemijski sastav;
4. Tehnički faktori, pri čemu moramo poznavati tehničke karakteristike objekta, njegovu namjenu i uvjete koji se moraju postići injektiranjem;
5. Faktori injektiranja, pri čemu moraju biti definirani sljedeći osnovni uvjeti:

- Gustoća bušotina, tj. razmak između bušotina u jednom redu i razmak među redovima,
- Dubina i nagib bušotina
- Injekcijska smjesa
- Pritisak injektiranja
- Sistem i redosljed injektiranja
- Kontrola uspjeha izvedenog injektiranja.

Tek pošto smo upoznali prva četiri faktora, može se pristupiti određivanju petog faktora. Elementi petog faktora su međusobno direktno ovisni i ne mogu se pojedinačno određivati, jer jedan od elemenata bitno utječe na svaki slijedeći element.

Tlak injektiranja

Kod svakog injekcijskog zahvata u terenu, uvijek si postavljamo pitanje maksimalno dozvoljenog pritiska injektiranja. Za takav odgovor ne postoje apsolutna pravila, budući da je stijena glavni faktor koji utiče na određivanje injekcijskog pritiska.

Pritisak kod injektiranja ima višestruku funkciju:

- Da svlada hidrauličke otpore u cjevovodima i tlu;
- Da neznatnom deformacijom tla poveća propusnost radi što boljeg toka injekcijske smjese kroz pore i pukotine;
- Da izazove kretanje injekcijske smjese u tlu unutar predviđenog radijusa oko injekcijske bušotine;
- Da se u tlu iscijedi višak vode iz injekcijske smjese u najsitnije pore i pukotine.

Pritisak se kod injektiranja kreće u veoma širokim granicama i zavisi od:

- Debljine (težine) nadsloja
- Čvrstoće i homogenosti stijene.

Definitivni matematički odnos za proračun pritiska injektiranja ne postoji.

Kod malih pritisaka postoji opasnost da se ne zainjektira određeni radijus oko injekcijske bušotine te da se injekcijska smjesa ne oslobodi viška vode i tako ne postigne odgovarajuću čvrstoću.

Kod velikih pritisaka može se izazvati raslojavanje i lom stijene oko bušotine, nepotrebno povećati utrošci injekcijske smjese, a može doći i do uzdignuća površine tla. Po pravilu su u homogenoj, makar i raspucanoj stijeni, povoljniji veći pritisci, jer osiguravaju bolju vezu preko pukotinskog sistema sa slijedećim bušotinama i povećavaju čvrstoću ugrađenoj injektiranoj masi.

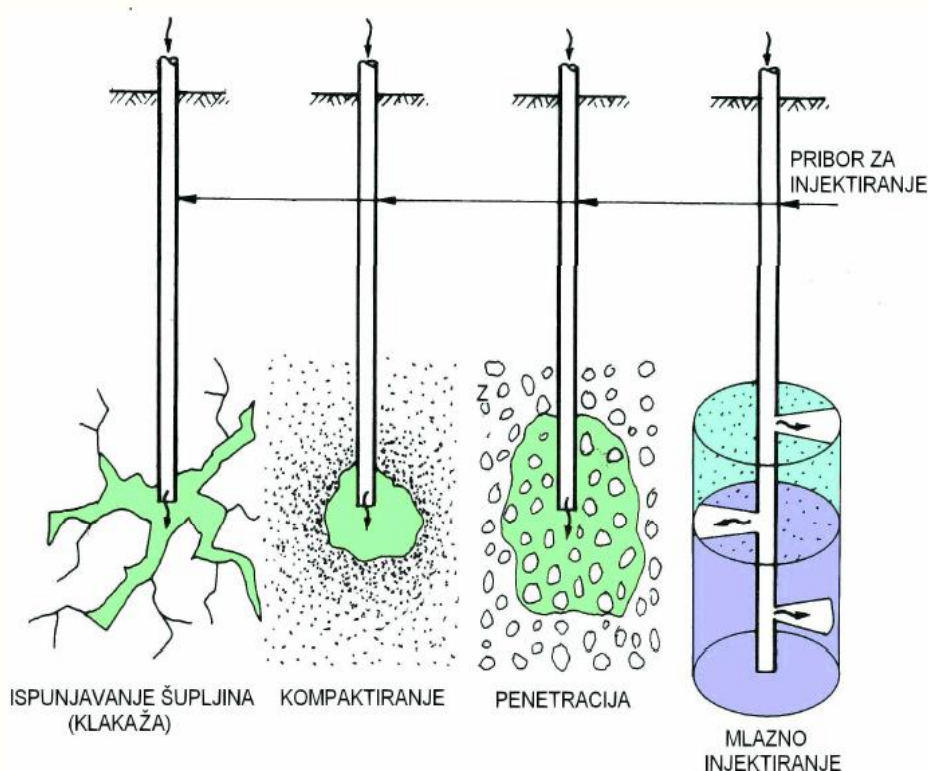
Manji će se pritisci primijeniti u plićim etažama, posebno kod horizontalno uslojenih stijena (npr. škrljavca) gdje postoji opasnost od uzdizanja tla.

Vrste injektiranja

Općenito, razne tehnologije injektiranja uključuju:

1. ispunjavanje praznih prostora u tlu postupkom injektiranja, pri čemu klakaža predstavlja poseban slučaj
2. kompaktiranje slojeva tla postupkom injektiranja

3. penetracijsko injektiranje
4. mlazno injektiranje



Slika 13. Shematski prikaz vrsta injektiranja

Ispunjavanje praznih prostora u tlu postupkom injektiranja podrazumijeva utiskivanje injekcijske smjese koja je, najčešće na bazi cementa, u prazne prostore, tj. šupljine tla, odnosno stijene.

Klakaža predstavlja postupak injektiranja kod kojeg se injekcijska smjesa utiskuje u tlo pod visokim tlakom zbog čega dolazi do hidrauličkog loma tla te se nastale pukotine ispunjavaju injekcijskom smjesom, a okolno tlo se zbija. Klakaža se učestalo primjenjuje kod čvrstog tla ili meke stijene.

Kompaktiranje injektiranjem podrazumijeva utiskivanje injekcijske smjese s visokim unutarnjim trenjem u stišljivo tlo, što se manifestira poput radijalne hidrauličke preše, pa dolazi do pomaka čestica tla i povećanja gustoće okolnog tla.

Penetracijsko injektiranje podrazumijeva utiskivanje injekcijske smjese u tlo pod razmjerno niskim tlakom, tako da ne dolazi do promjene obujma i strukture tla.

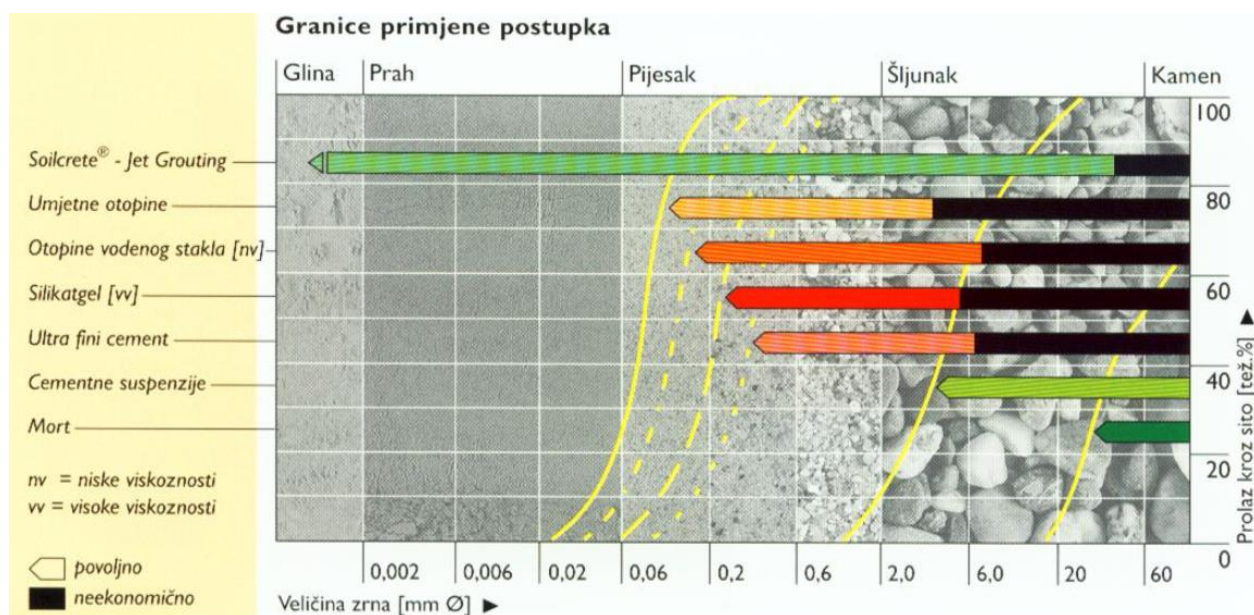
Injekcijske smjese koje se pri tome koriste raznog su sastava i karakteristika, a osnovna baza za njihovo određivanje je propusnost tla, tako se, ovisno o koeficijentu propusnosti k , koriste sljedeće smjese:

- cementne smjese - koriste se kada je $k > 10^{-2}$ cm/s
- silikatne smjese - koriste se kada je k veličine 10^{-2} do 10^{-4} cm/s
- rezorcinske smjese - koriste se kada je k veličine 10^{-4} do 10^{-6} cm/s

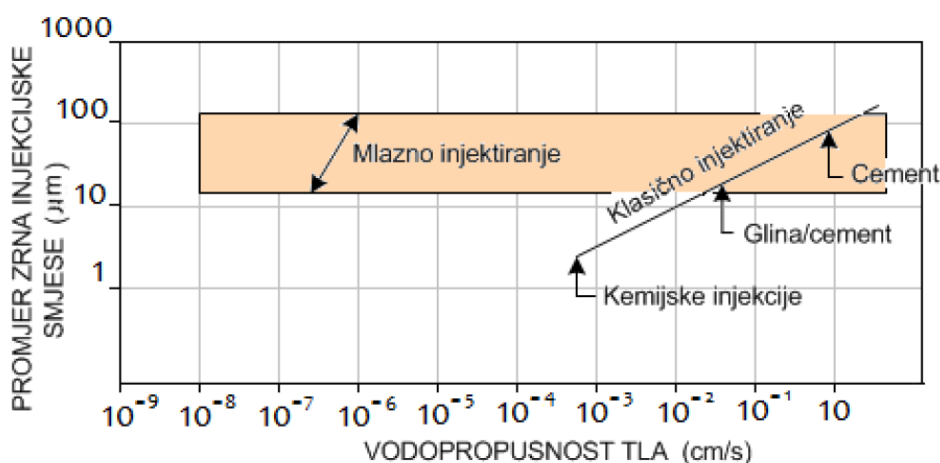
Kod slabije propusnih tala, općenito nije moguća ovakva vrsta injektiranja.

Mlazno injektiranje predstavlja tehnologiju injektiranja čijom se primjenom posve razbija struktura tla, te se čestice tla miješaju (in-situ) s vezivnim sredstvom tako da nastaje homogenizirana masa poboljšanih svojstava.

Tehnologija se primjenjuje kod raznih vrsta tla s raznim injekcijskim smjesama. Najčešće su to vodo-cementne, te vodo-cementno-bentonitne smjese, a u određenim slučajevima koristi se i vapno (čisto vapno, vapno s cementom i dr.).



Slika 14. Primjenjivost injekcijskih smjesa u odnosu na promjer čestica tla



Slika 15. Primjenjivost injekcijskih smjesa u odnosu na vodopropusnost

U posljednjih dvadesetak godina sve se više koristi postupak injektiranja tla pod visokim tlakom, tzv. **mlazno injektiranje**.

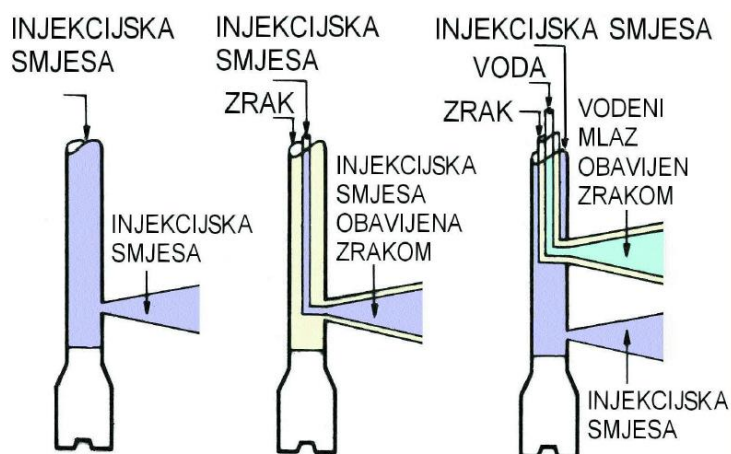
U tlo se utiskuje cijev (na čijem vrhu su mlaznice) do potrebne dubine. Pri izvlačenju se cijev rotira i ispušta fluid (voda, zrak, ili i jedno i drugo) pod visokim tlakom kojim se razbija i usitnjava tlo, a zatim se upuhuje pod vrlo velikim tlakom cementna smjesa koja veže razbijene dijelove tla (razna nastala zrna tla i komade tla).

Postoji tehnologija sa jednim fluidom (injekcijska smjesa), dva fluida (injekcijska smjesa + zrak) i tri fluida (injekcijska smjesa + zrak + voda).

Vezivo je cementni mort, koji se utiskuje tlakom od oko 300-500 bara, dok se zrak utiskuje tlakom 7-12 bara. Više fluida znači veći promjer pilota, bolju izvedbu (npr. u glini), veći tlak znači veći promjer pilota (od 50-80 cm, uobičajeno).

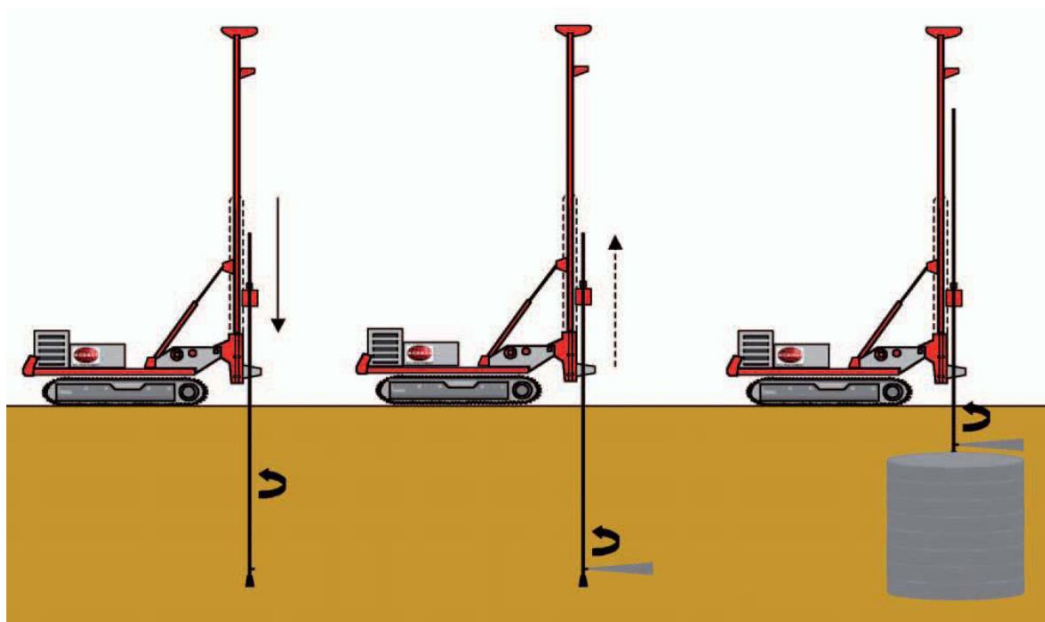
Razlikuju se tri osnovna postupka izvedbe mlaznog injektiranja, a koja su ujedno i osnova za barem dvanaestak različitih varijacija. Navedeni postupci su:

1. **Jednofluidni sustav** (injekcijska smjesa)
2. **Dvofluidni sustav** (injekcijska smjesa + zrak ili injekcijska smjesa + voda)
3. **Trofluidni sustav** (injekcijska smjesa + voda + zrak)

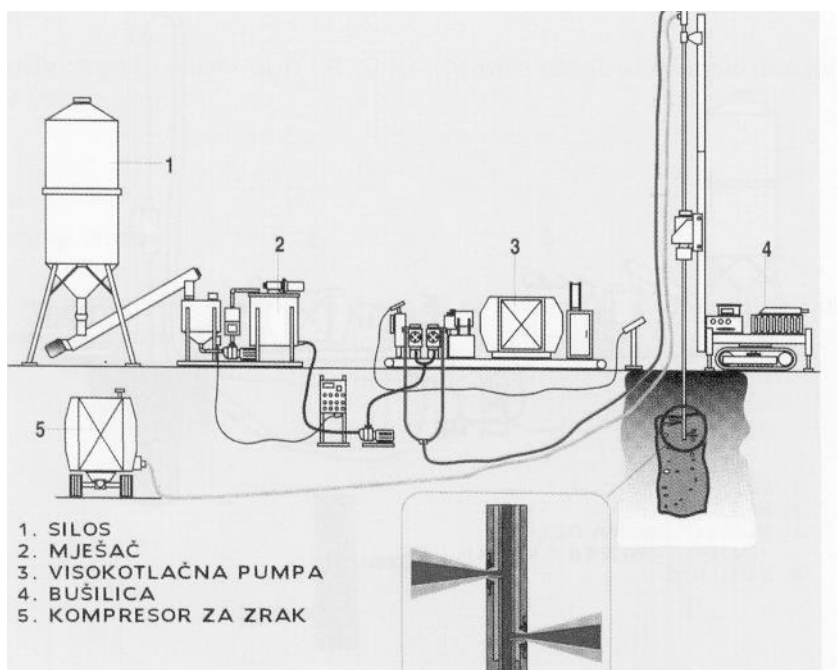


Slika 15 . Detalj pribora za mlazno injektiranje s jednim, dva i tri fluida

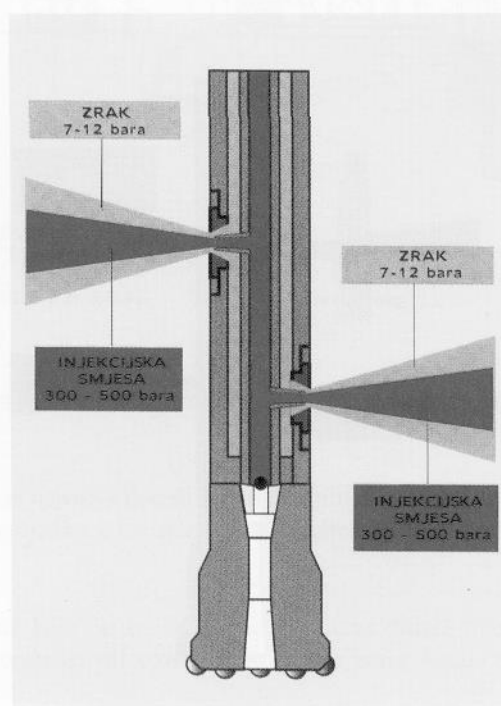
Sva tri sustava mlaznog injektiranja sastoje se od dvije osnovne radnje - izvedbe bušotine određene dubine i provedbe mlaznog injektiranja (slika 64.).



Slika 64. Faze rada prilikom mlaznog injektiranja



lika 11. Shematski prikaz postrojenja dvofluidnog sustava mlaznog injektiranja



Slika 12. Shema toka fluida

sl. 16. Princip izvedbe mlaznog injektiranja (iz knjige Mlazno injektiranje, Conex,1997.)

U šljuncima i pijescima postupak je dosta jednostavan i proizvodi betonske stupove. Problem je s glinama, u kojima se posebnom tehnikom mlaznica i postupka rada fluidima glina kida na male komade i cementira upuhujućim cementom. Vodocementni faktor smjese utječe na čvrstoću konačnog elementa.

Parametri izvedbe		Broj fluida		
		Jedan fluid	Dva fluida	Tri fluida
Tlak injektiranja (bar)	Voda	-	-	300 – 550
	Injek. Smjesa	300 – 550	300 – 550	10 – 40
	Zrak	-	7 – 17	7 – 17
Protok	Voda (l/min)	-	-	70 – 100
	Injek. Smjesa (l/min)	60 - 150	100 - 150	150 - 250
	Zrak (m ³ /min)	-	1 - 3	1 - 3
Promjer mlaznica (mm)	Voda	-	-	1,8 - 2,6
	Injek. Smjesa	1,8 - 3,0	2,4 - 3,4	3,5 - 6,0
Broj mlaznica (kom)	Voda	-	-	1 - 2
	Injek. Smjesa	2 -6	1-2	1
W/C		0.8 : 1 do 2 : 1		
Sadržaj cementa	(kg/m')	200-500	300-1000	500-2000
	(kg/m ³)	400-1000	150-550	150-650
Brzina rotacije šipki (okr/min)		10-30	10-30	3-8
Brzina podizanja šipki (min/m)		3-8	3-10	10-25
Promjer injek. Valjka (m)	Krupnozrnato tlo	0,50-1,00	1,00-2,00	1,50-3,00
	Sitnozrnato tlo	0,40-0,80	1,00-1,50	1,00-2,00
Čvrstoća valjka (N/mm ²)	Pjeskovito tlo	10-30	7,5-15	10-20
	Glinovito tlo	1,5-10	1,5-5	1,5-7,5

Tablica 6. Prikaz parametara izvedbe tri sustava mlaznog injektiranja

PROMJERI STUPNJAKA				
Vrsta fla	Sustav	Srednji promjer (m)	Faktor usporedbe	
Krupnozrnato tlo	Jedan fluid	0,75	1,00	
	Dva fluida	1,50	2,00	
	Tri fluida	2,25	3,00	
Sitnozrnato tlo	Jedan fluid	0,60	1,00	
	Dva fluida	1,25	2,10	
	Tri fluida	1,50	2,50	
ČVRSTOĆA STUPNJAKA				
Vrsta fla	Sustav	Srednja čvrstoća (N/mm ²)	Faktor usporedbe	
Krupnozrnato tlo	Jedan fluid	20,00	1,00	
	Dva fluida	11,25	0,56	
	Tri fluida	15,00	0,75	
Sitnozrnato tlo	Jedan fluid	5,75	1,00	
	Dva fluida	10,75	1,90	
	Tri fluida	4,50	0,80	
UTROŠAK CEMENTA				
Sustav	Utrošak cementa (kg/m')	Faktor usporedbe		
Jedan fluid	350	1,00		
Dva fluida	650	1,85		
Tri fluida	1250	3,60		
ZBIRNA USPOREDBA				
Sustav	Srednji promjer (m)	Volumen tijela (m ³ /m')	Utrošak cementa (kg/m')	Faktor usporedbe
Jedan fluid	0,75	0,44	350	1,00
Dva fluida	1,50	1,77	650	0,50
Tri fluida	2,25	3,97	1250	0,40

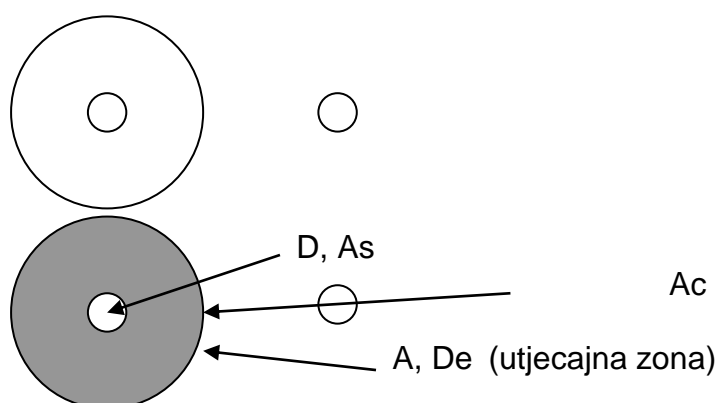
Tablica 7. Usporedbe tri sustava mlaznog injektiranja (sustav s jednim fluidom predstavlja etalonsku vrijednost veličine 1,0)

PRORAČUN PILOTA U POBOLJŠANJU TLA

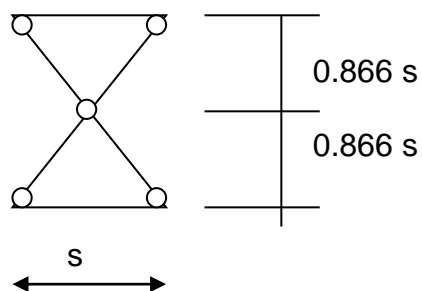
Proračunom se uvijek treba utvrditi nosivost i deformabilnost pojedine komponente u sustavu. Kod pilota jedna je komponenta osnovno tlo, a druga pilot. Iz uvjeta jednakih deformacija (uz uvažavanje krutosti materijala), dobije se raspodjela naprezanja na tlo i na pilote, odnosno ukupno opterećenje na pilote i na tlo.

Budući da su piloti na nekom razmaku oni zaokupljaju samo dio tlocrtna površine ispod temelja (ili nasipa). Taj se dio računa kako bi se znao udio pilota u jediničnoj površini, pa se gotovo u pravilu definira parametar "a" (area net ratio):

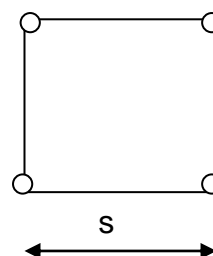
a = površina pilota u odnosu na pripadnu površinu tla, i taj se kreće od 0.2-0.3, uobičajeno, što ovisi o promjeru pilota, njihovom razmaku i rasporedu (trokutasti-pravokutni).



trokutasti raspored (triangular)



kvadratični raspored



OSNI RAZMAK = s , Promjer pilota = D , EFEKTIVNI PROMJER – UTJECAJNI:

$De = 1.05 s$, za trokutasti raspored, $D = 1.13 s$ za kvadratični raspored

AREA REPLACEMENT FACTOR:

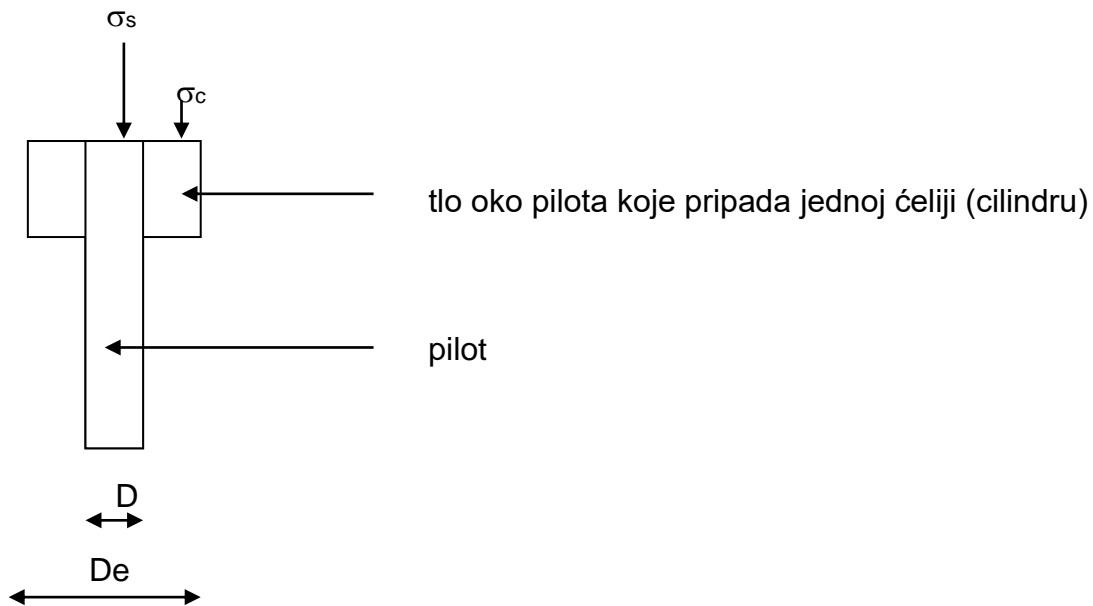
$$a_s = A_s / A,$$

A_s = površina pilota, A = površina utjecajne zone sa De , A_c = površina tla u cilindru

$$A_c = A - A_s$$

$$a_c = A_c / A = (A - A_s) / A = 1 - a_s$$

Koncentracija napona

**uvjet: jednakost vertikalnih deformacija**

$n = \sigma_s / \sigma_c$ = koeficijent koncentracije napona, odnos napona u pilotu i u okolnom tlu

na nekoj dubini je prosječni napon:

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s)$$

pa je uz "n"

$$\sigma_s = n \sigma / (1 + (n-1)a_s) = \mu_s \sigma$$

$$\sigma_c = \sigma / (1 + (n-1)a_s) = \mu_c \sigma$$

odnosno

$$\mu_s = n \mu_c$$

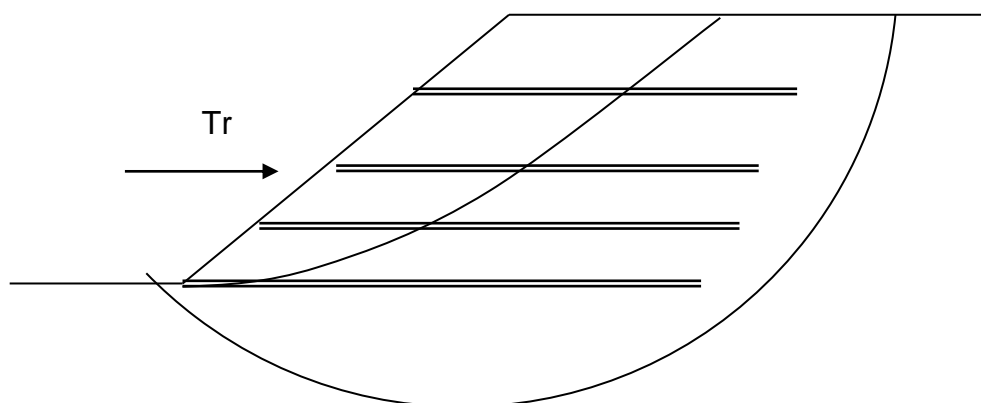
za $L \geq 2D$ vrlo malo napona dolazi do dna stupa

2. POSTUPCI POBOLJŠANJA UVJETA U TLU

Ukoliko nekim zahvatom izvedemo novi element u tlu koji se učestalo ponavlja u volumenu tla koji je zahvaćen geotehničkim zahvatom, tada govorimo o prosječnom poboljšanju uvjeta u tlu. Tlo poboljšano takvim mjestimičnim intervencijama (koje imaju svoj raster i volumen novog materijala bitno boljih svojstava) možemo tretirati kao "novo tlo" s prosječno boljim svojstvima. Na primjer, izvedba niza pilota od šljunka u temeljnom tlu, ili armirani nasip, mogu se tako tretirati.

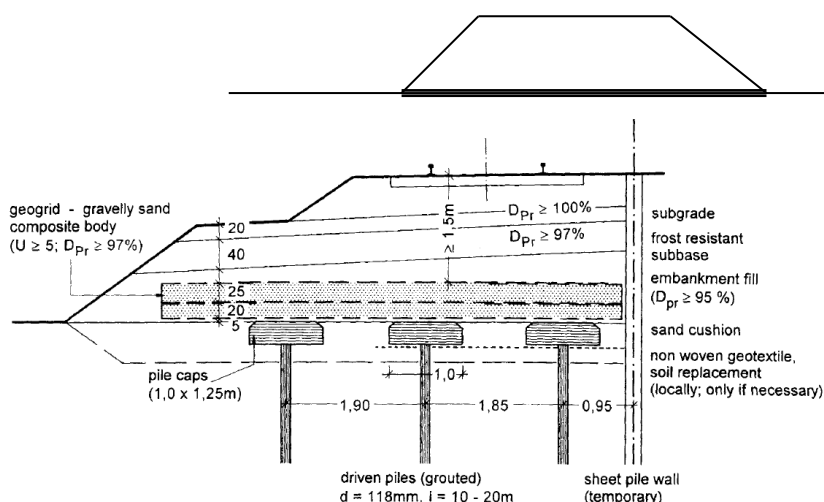
Armiranje tla

Posmična čvrstoća tla je ograničena, tj. definirana. Ako geometrija zahvata i svojstva tla mobiliziraju posmična naprezanja jednaka čvrstoći tla, slom tla time je postignut. Ukoliko se takvo klizno tijelo ojača na način da se u slojevima postave elementi (slika 6) koji daju dodatnu silu T_r (sila od umetnutih ojačanja koja se aktivira kretanjem kliznog segmenta a preuzima ju tlo iza klizne plohe trenjem s geosintetikom), kritična klizna ima veći faktor sigurnosti protiv sloma). Armatura u tlu je u vidu horizontalnih ravnina (geotekstil, geomreža), postavljenih na mjesta određena proračunom (vertikalni razmak) i u potrebnoj duljini (radi sidrenja).



sl.17. armirano tlo – suvremeni postupak u izvedbi nasipa

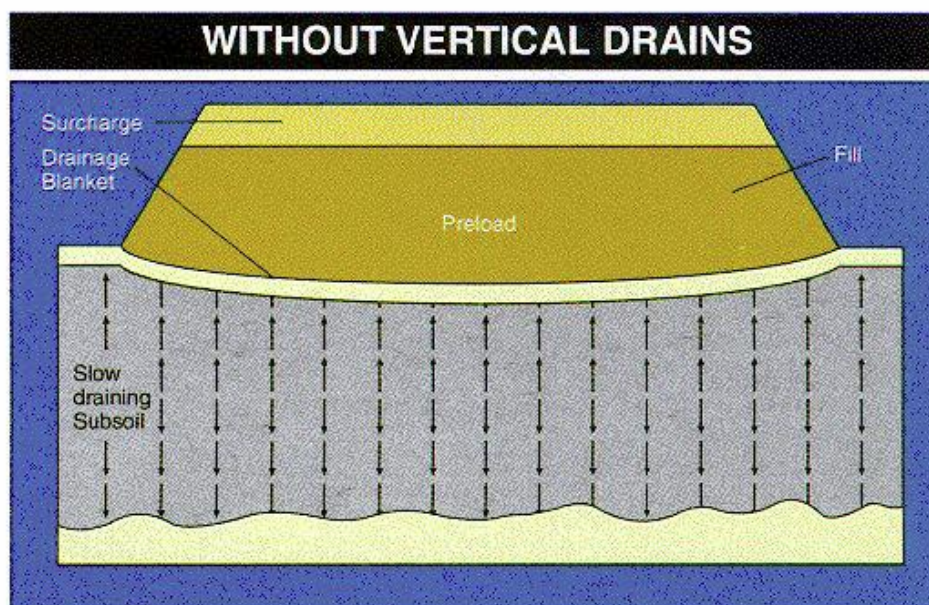
Slično se postiže poboljšanje uvjeta ispod nasipa na mekom tlu, gdje čvrsti dodatak u kontaktu s temeljnim tlom sprječava posmične deformacije i time povećava nosivost temeljnog tla i smanjuje slijeganja.



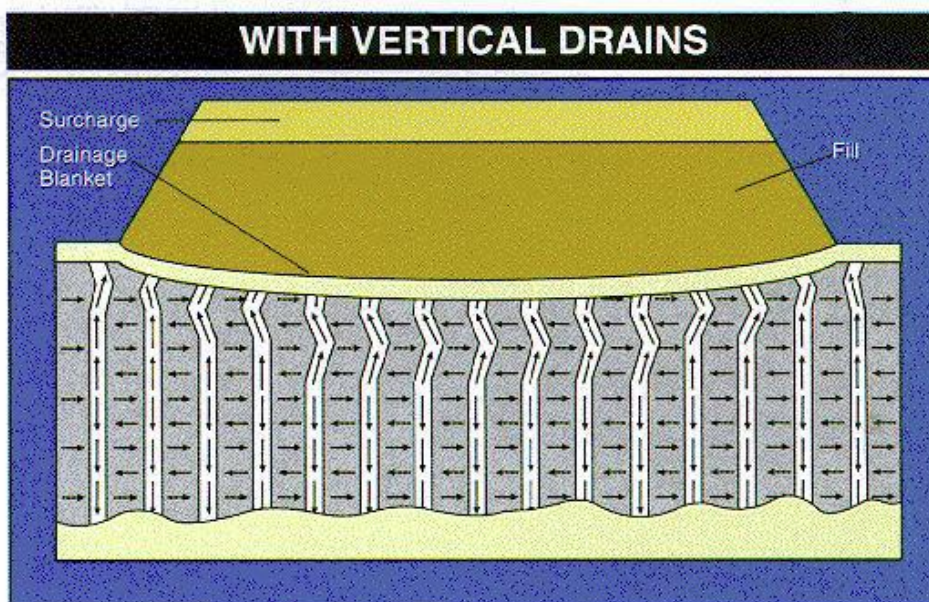
sl. 18. poboljšanje uvjeta nosivosti mekog temeljnog tla – tepih ispod nasipa, piloti

EFEKTI UBRZANJA SLIJEGANJA - DRENIRANJA

Šljunčani i vapneno-cementni piloti djeluju i kao drenovi, koji ubrzavaju konsolidaciju radijalnim dreniranjem. Računa se da je vapneno-cementni pilot 400-1000 puta propusniji od osnovnog tla.

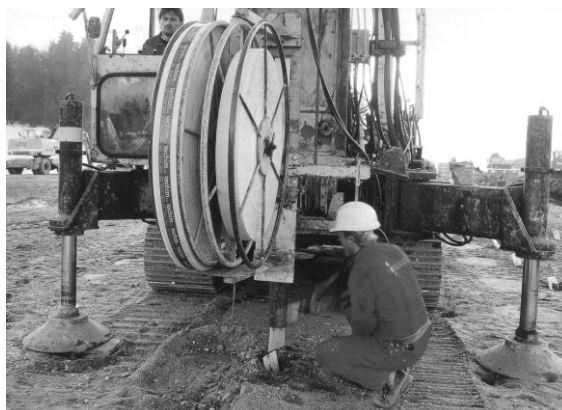


Without inserting PVD, dissipation of excess pore pressure is a slow process.



With PVD the excess pore pressure dissipates quickly through shorter drainage paths.

slika 1. Vertikalni drenovi – bočno dreniranje ubrzava konsolidaciju



sl. 18. Prefabricirani drenovi su vrlo efikasni, postavljaju se brzo i jednostavno, posebnim strojem

Vrijeme i stupanj konsolidacije mogu se izračunati iz slijedećih izraza:

$$u = 1 - e^{-\left[\frac{-2c_h t}{R^2 f(n)} \right]} \quad t = -\frac{\ln(1-u)}{2c_h} R^2 f(n)$$

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[\ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right] + \left[\frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{k_{tlo}}{k_{pilot}} \cdot L_D^2 \right]$$

gdje je:

c = osni razmak pilota, R = utjecajni polumjer pilota, za kvadratni raspored = $0.56 c$
 r = polumjer pilota, L_D = put dreniranja u pilotu, $n=R/r$, c_h = horiz. koef. konsol. ($\approx 2c_v$)

Primjer: Glinena podloga nasipa debljine 8 m, ispod koje je šljunak, ima koeficijent vertikalne konsolidacije $c_v = 0.002 \text{ cm}^2/\text{s}$ a koeficijent horizontalne konsolidacije $c_h = 0.006 \text{ cm}^2/\text{s}$. Slijeganje ove gline bilo bi obavljeno za oko 18-20 mjeseci, a slijeganje iste gline uz primjenu drenova (npr. šljunčani ili vapneni piloti, promjera 55cm, na razmaku 1-1,2 m) bilo bi dovršeno za oko 20 dana.

Treba računati sa zonom oko propusnog pilota koja je zaglinjena, pa se efektivni promjer pilota za račun vremena konsolidacije smanjuje u odnosu na izvedeni promjer pilota, što može iznositi 10-20% promjera.

Ponekad se izvode i pješčani piloti, tako da se u bušotinu sipa pijesak.

Svi ovi piloti trebaju proći tzv. probno ispitivanje, tj. mora se odrediti njihova nosivost pokusnim opterećenjem. Taj postupak provodi se po propisanim principima i vrlo je koristan za ozbiljne projekte gdje se koriste masovno ovakvi piloti.

Danas se koriste prefabricirani drenovi koji se utiskuju u tlo posebnim strojem (slika 9.), na razmaku 0.8-1.2 m i omogućuju vrlo brzo dreniranje uz veliku brzinu instalacije i male troškove. Njihova dimenzija je 3 x 100 mm, pa se efektivni radijus u prethodnim izrazima (R) uzima kao 2-3 mm (kao da se ovi plosnati drenovi ponašaju jednako kao cijevni dren malog promjera).